

今後のエネルギー情勢と技術選択

平成15年10月24日

筑波大学 内山洋司

発表内容

エネルギー供給の基本要件

超長期のエネルギー需給

最近のエネルギー情勢

今後のエネルギー技術の選択

エネルギー供給の三要件



エネルギー資源

化石燃料

原子力

再生可能エネルギー

入手しやすさ

化石燃料

資源は豊富、コストも安価

供給途絶不安がある(特に石油)

原子力

資源は豊富、コストも安価

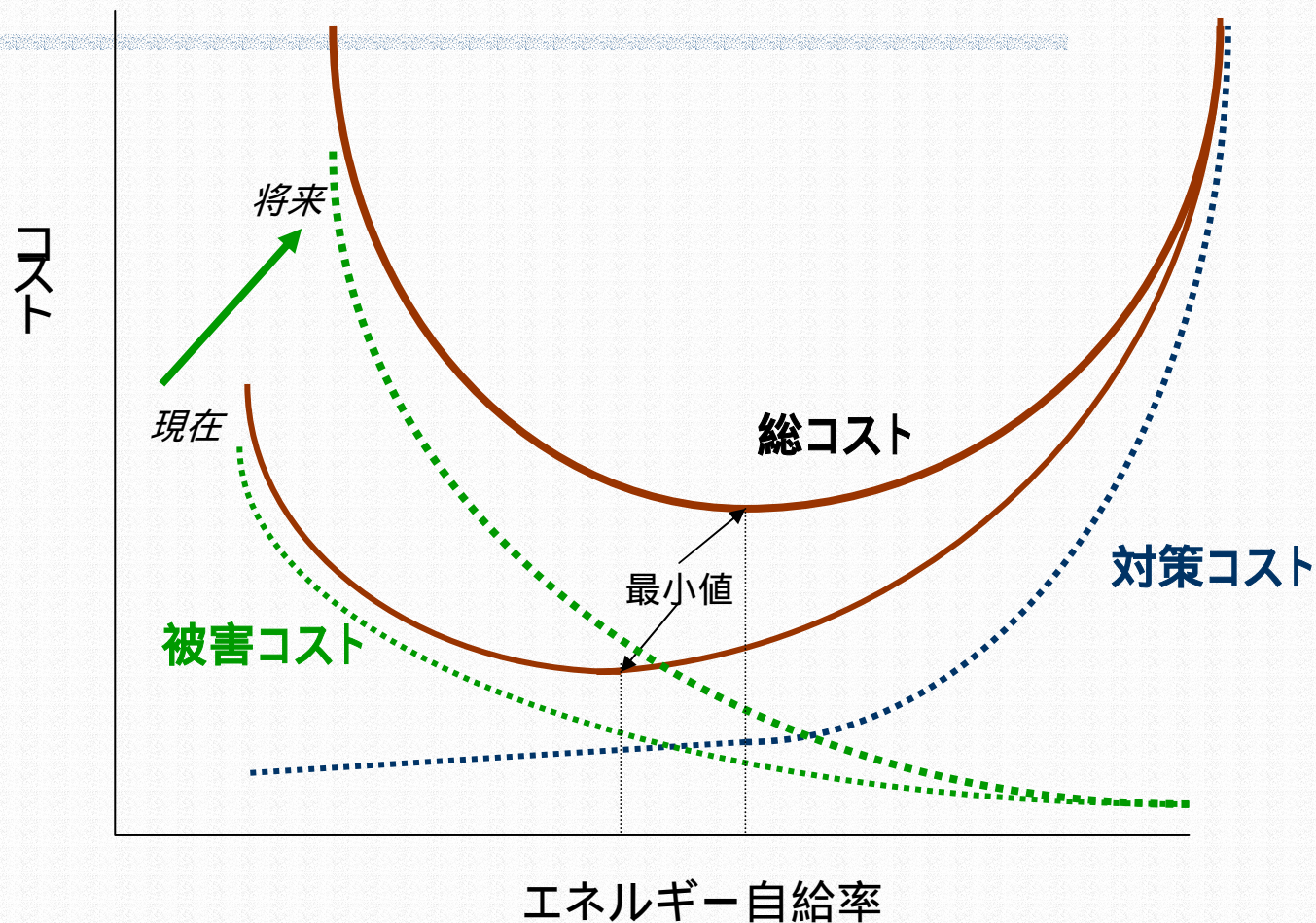
プルトニウムは準国産エネルギー

再生可能エネルギー

資源は潜在的に豊富で供給途絶もない

地域的に偏在しコスト高

セキュリティ(入手しやすさ)と費用関数



使いやすさ

化石燃料

燃料の取り扱い

電気：信頼性（停電不安がない）と質（電圧と周波数に変動がない）は高い

原子力

核燃料サイクルの整備

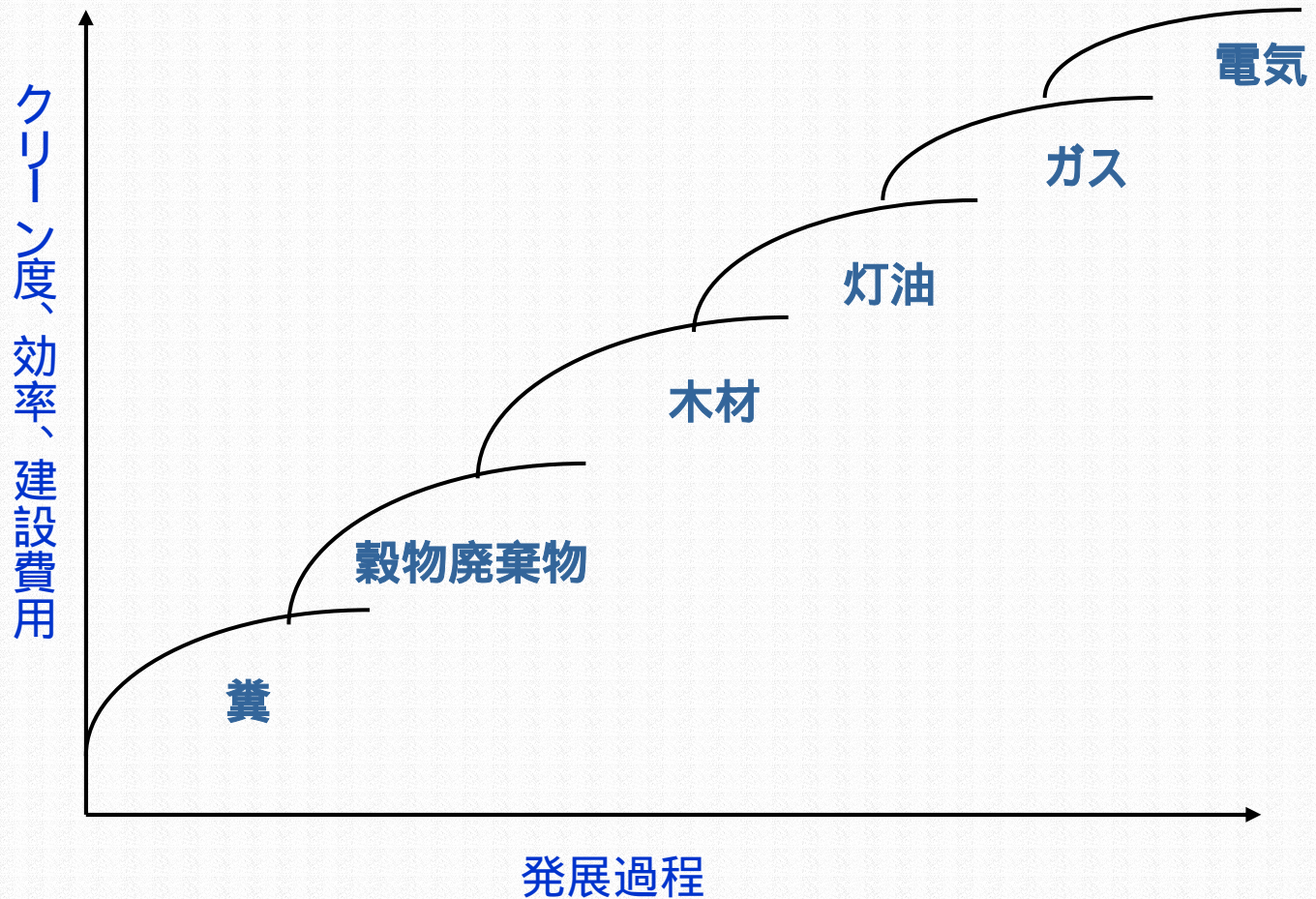
電気：信頼性と質は高い

再生可能エネルギー（主に太陽光と風力）

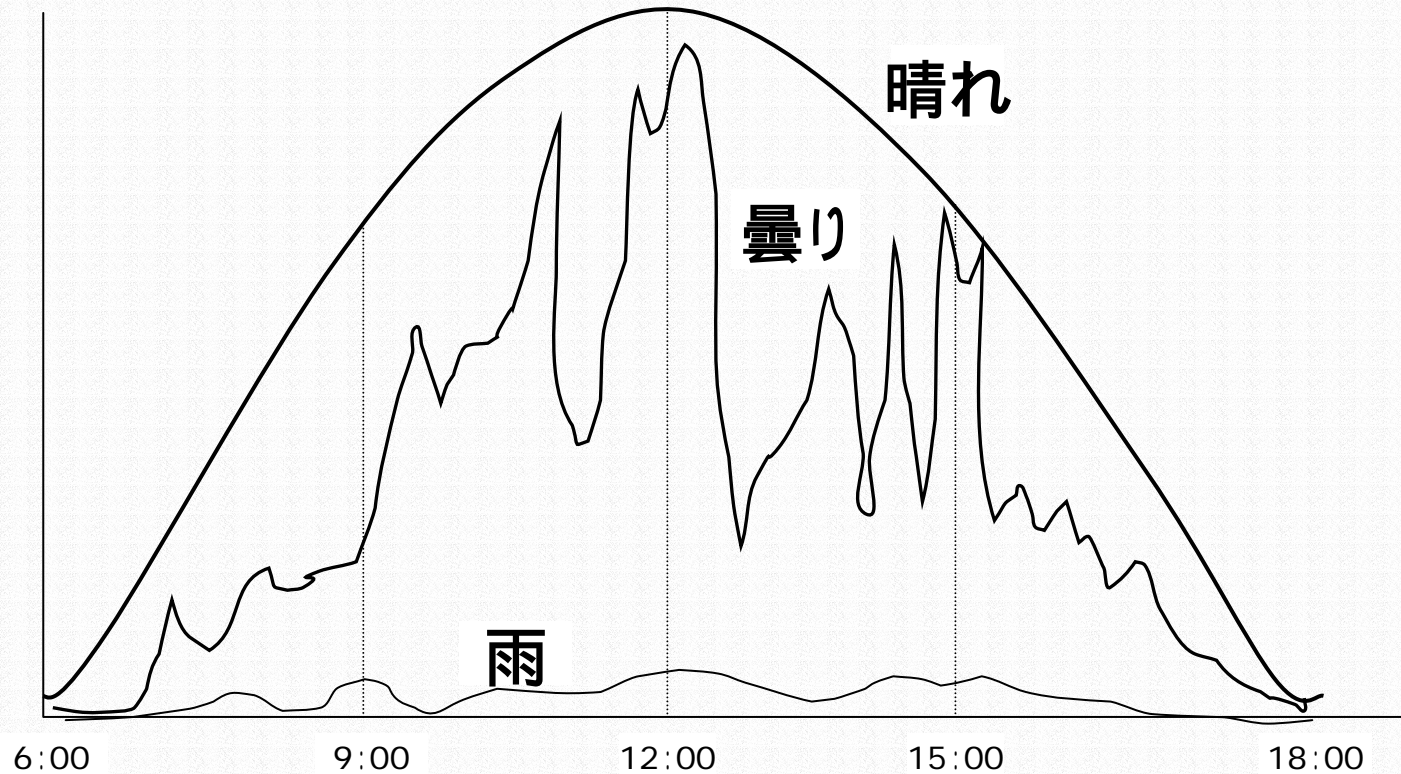
エネルギーとしての不安定性

電気：季節・週・日で出力が変動、電圧・周波数が変動

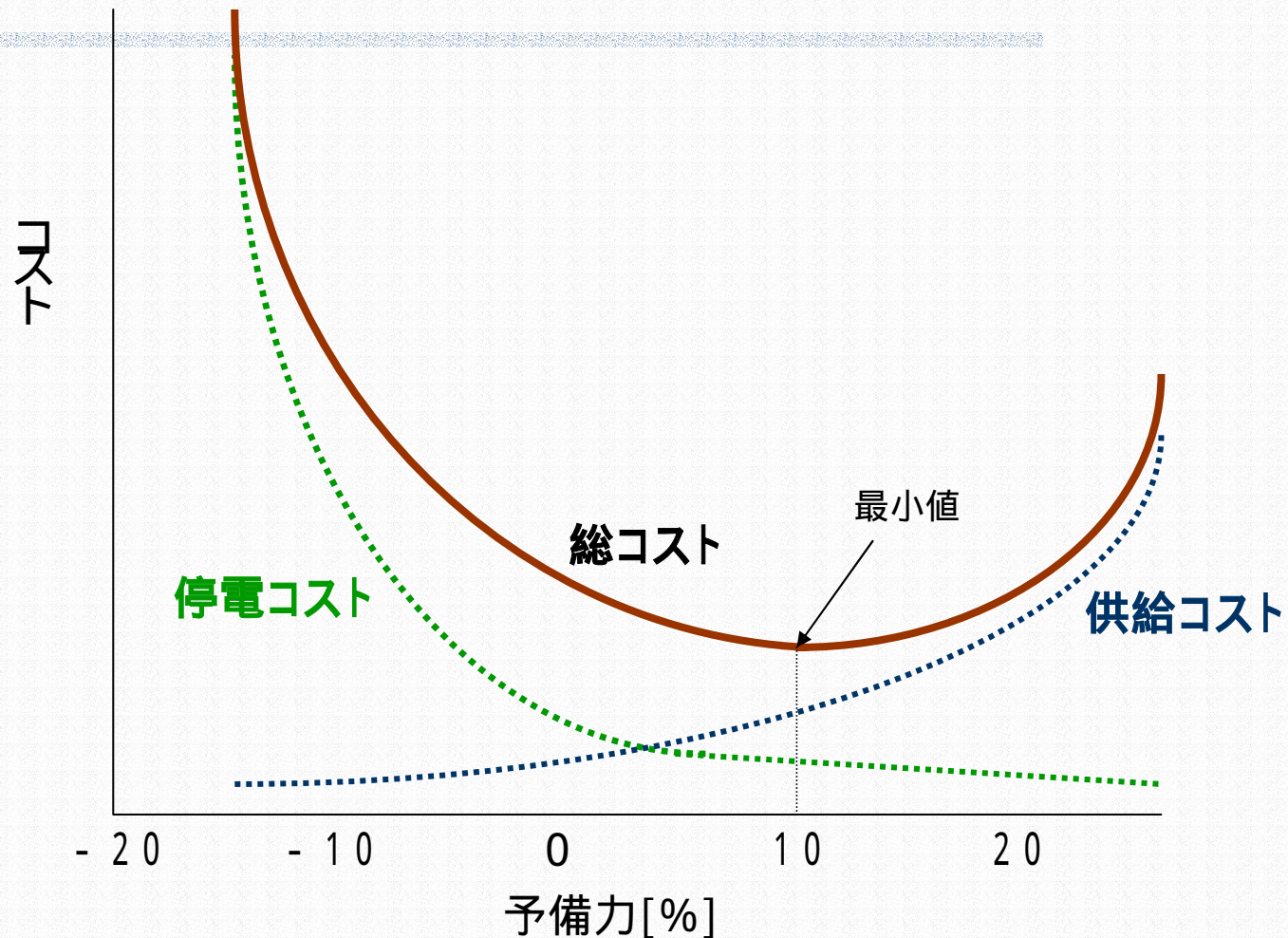
使いやすさ(家庭のエネルギー)



太陽光発電の一日の出力曲線



予備力(使いやすさ)と費用関数



受け入れやすさ

化石燃料

酸性雨、温暖化問題

事故への不安 (炭坑爆発、タンカーの座礁、ガス爆発)

原子力

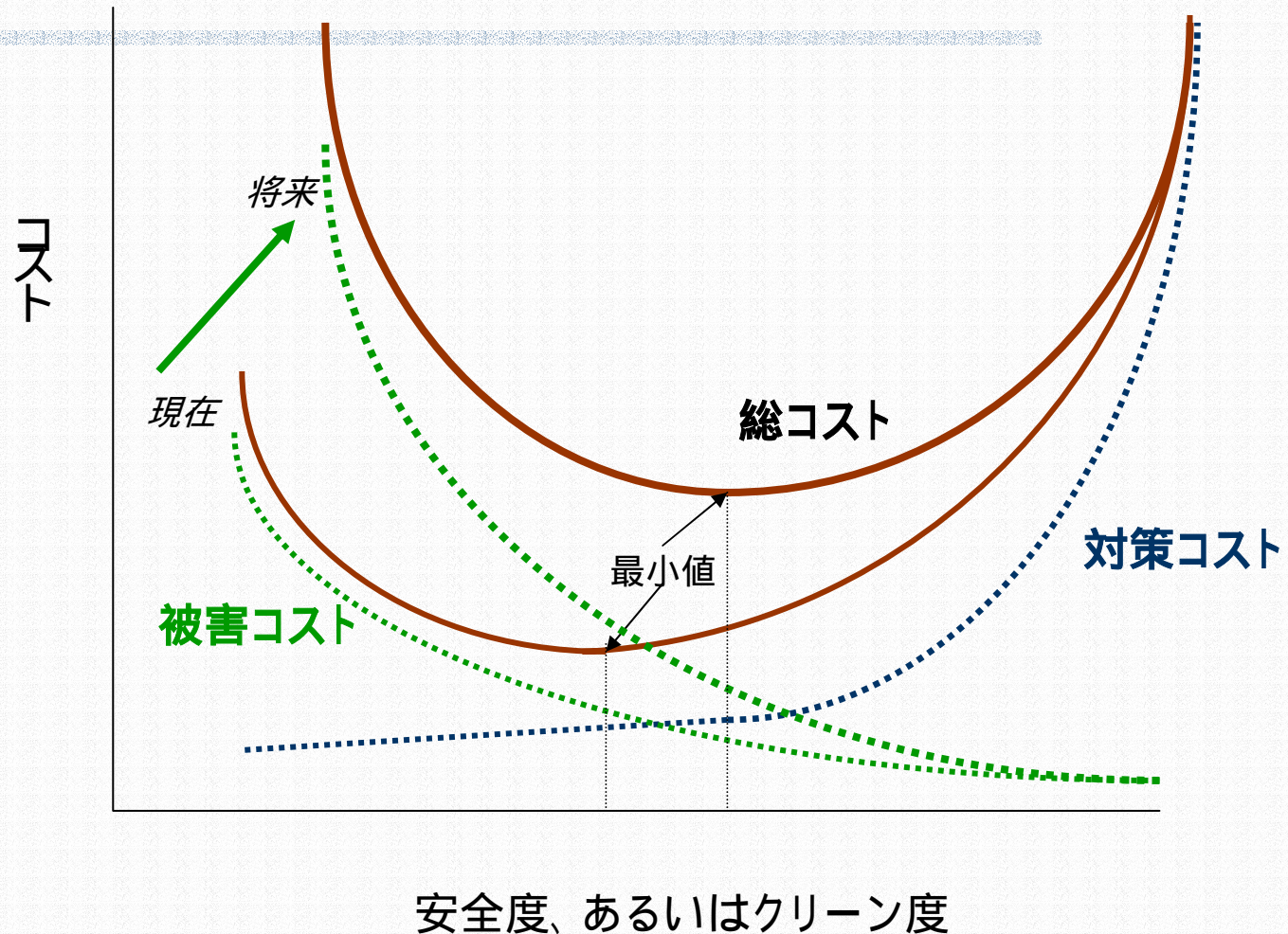
放射性物質の漏洩

原子力事故への不安

再生可能エネルギー

最も安全でクリーン (風力: 渡り鳥被害、高調波による電波障害、騒音 太陽光: アイランディング対策、半導体工場でのフロン対策 廃棄物: ダイオキシン対策)

安全と環境(受け入れやすさ)の費用関数



最近のエネルギー情勢

- 需要：伸びが停滞（ゼロサム社会）
- 供給：技術の小型分散化
- 産業：エネルギー・電力産業の自由化
- 環境：環境意識の高まり（CO₂削減目標）
- 政策：利用者サイドの重要性

エネルギー・電力産業の自由化

利点：競争によるコスト削減

小規模分散型技術の開発

課題：経済外部性の軽視

- (1) 中長期の設備計画(供給力の確保)**
- (2) エネルギーセキュリティ**
- (3) 環境問題**
- (4) 省エネルギー**
- (5) 離島・僻地のエネルギー供給**

海外における脱原子力の動き

チェルノブイリ事故(1986年)

ドイツの原子力廃止計画(耐用期間32年)

エネ需要の低迷、石炭産業の育成、ロシアの天然ガス

スウェーデンのバーセベック炉廃止(1999年)

1980年議会決定(代替エネの難しさ)、デンマークから輸入(石炭火力)

台湾における脱原子力

与党が建設中止を撤回

アメリカの原子力政策

新設ゼロ、稼働率向上(65% ⇒ 85%)

豊富な資源と供給ルート

欧州の天然ガス: 北海、ロシア、アフリカ、中東

米国の豊富な資源: 石油、ガス、石炭

中・長期のエネルギー情勢

難しい省エネルギー（都市化、豊かさ、快適さの追求）

天然ガス需要の高まり（環境問題で順風）

エネルギー基盤施設の更新（火力と原子力）

不透明な中東情勢（不安定になる石油供給）

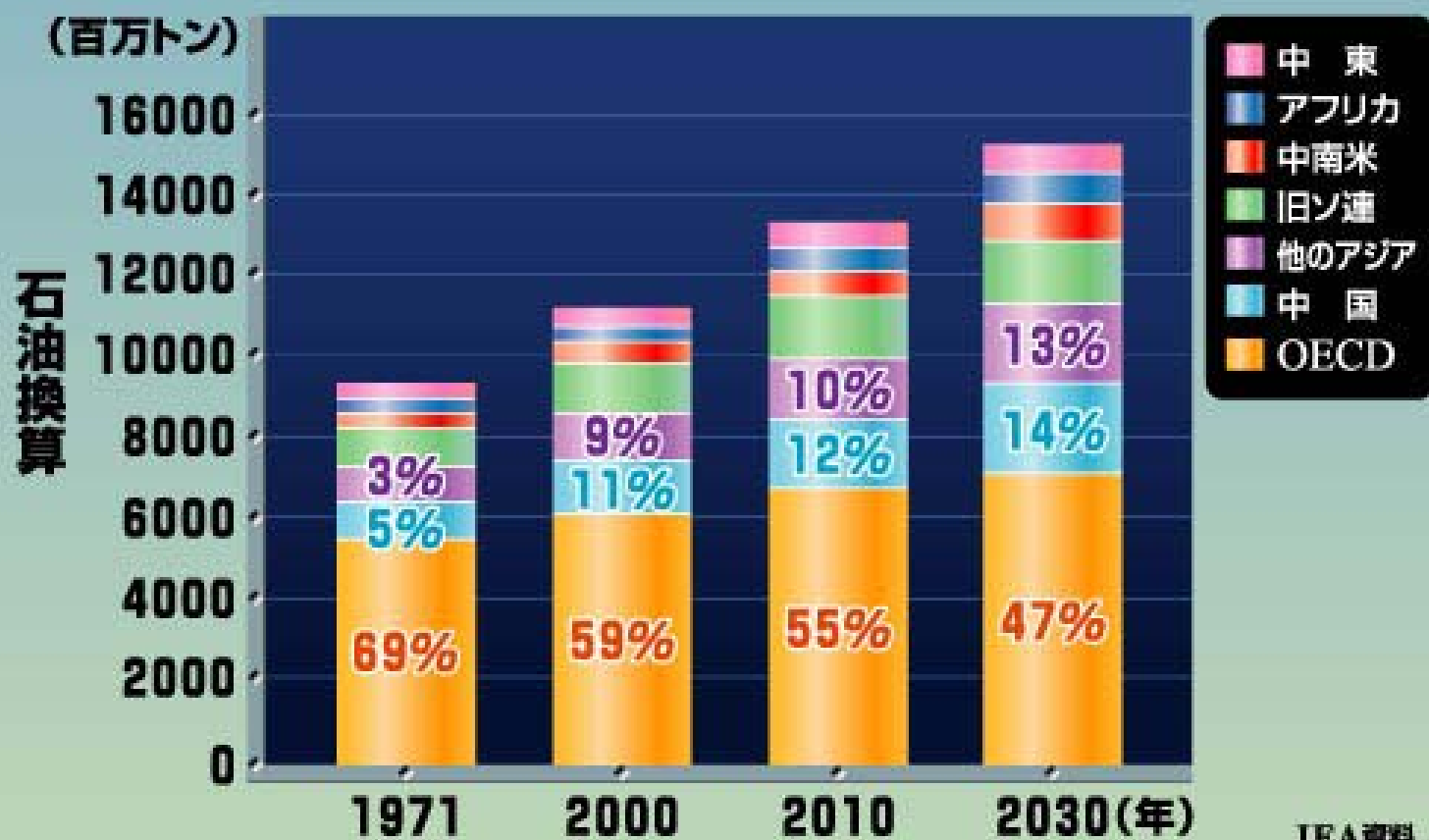
増大するアジア地域のエネルギー需要

（経済発展と人口増加、中国のオリンピック景気？）

アジア地域のエネルギーセキュリティと環境問題

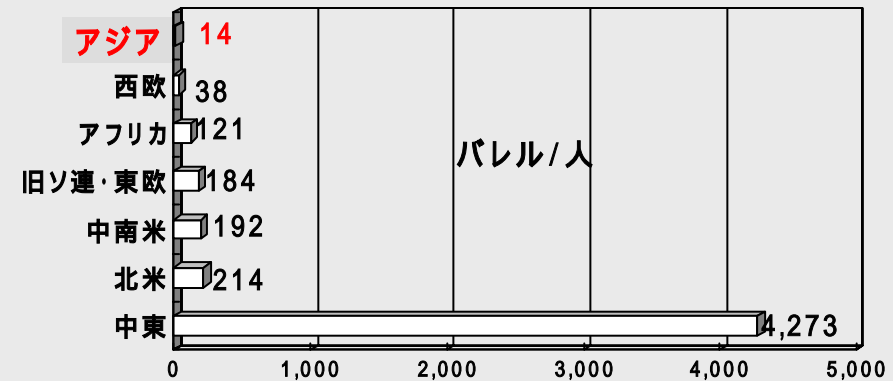
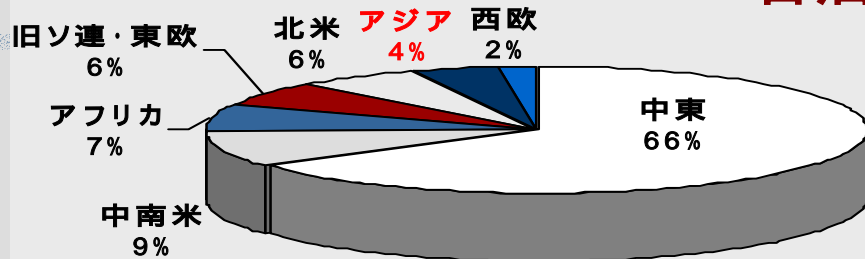
厳しさが増す地球温暖化対策

世界のエネルギー需要予測

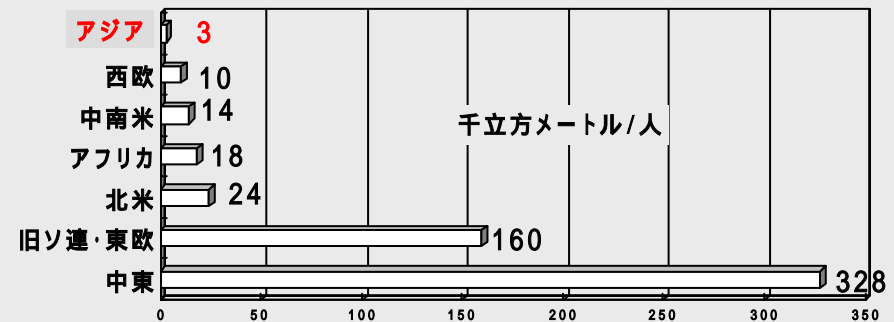
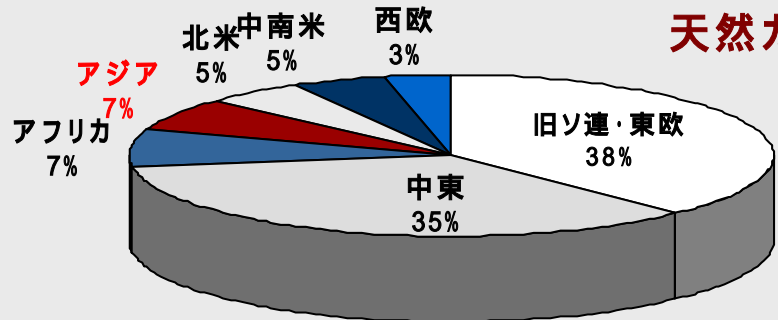


地域別に見た化石燃料の確認埋蔵量

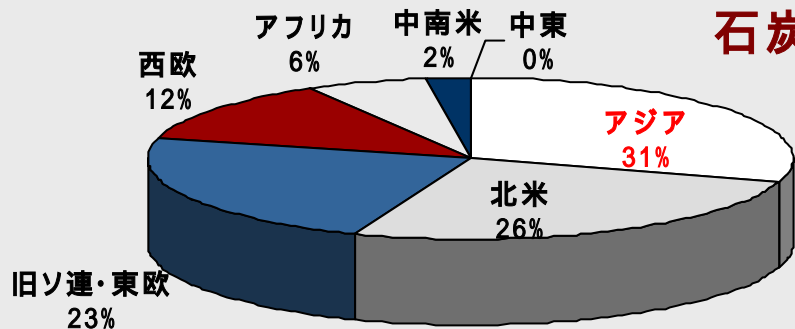
石油



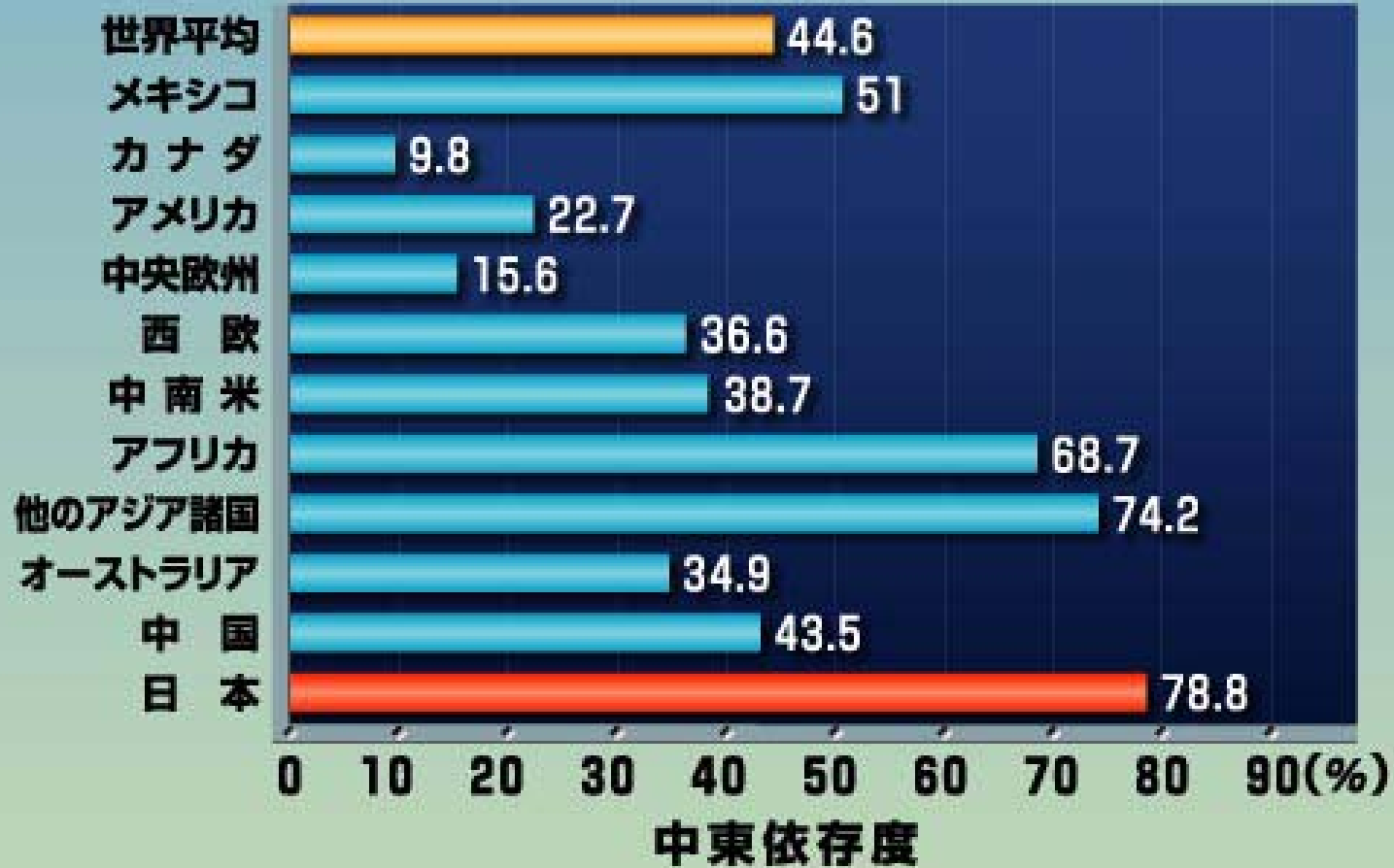
天然ガス



石炭



国・地域別にみた石油の中東依存度



アジア地域のエネルギー問題

増大するエネルギー需要

(経済発展と人口増加, 中国のオリンピック景気)

難しい省エネルギー (都市化、豊かさ、快適さの追求)

不透明な中東情勢 (不安定になる石油供給)

人口に対する化石燃料資源が乏しいアジア地域

巨額な資金を要する天然ガス利用

石炭利用による環境問題

厳しさが増す地球温暖化対策

アジア地域に求められているエネルギー供給基盤整備

| | エネルギー供給基盤施設 |
|------|---|
| 石油 | <p>製油所の建設</p> <p>輸入原油・石油製品の受入施設</p> <p>緊急時対策としての石油備蓄基地</p> |
| 石炭 | <p>中国における鉄道など石炭輸送網の整備</p> <p>輸入石炭の受入港湾施設</p> <p>環境保全のためのクリーンコール技術開発</p> |
| 天然ガス | <p>中国やインドなどへのLNG供給チェーン</p> <p>アジア地域の広域天然ガス幹線パイプラインの整備</p> <p>各国における天然ガスの基幹パイプラインと末端網の整備</p> |
| 電力供給 | <p>発電所の新設</p> <p>幹線送電線と末端配電網の整備</p> <p>長期的な視点からの原子力発電と再生可能エネルギーの導入</p> |

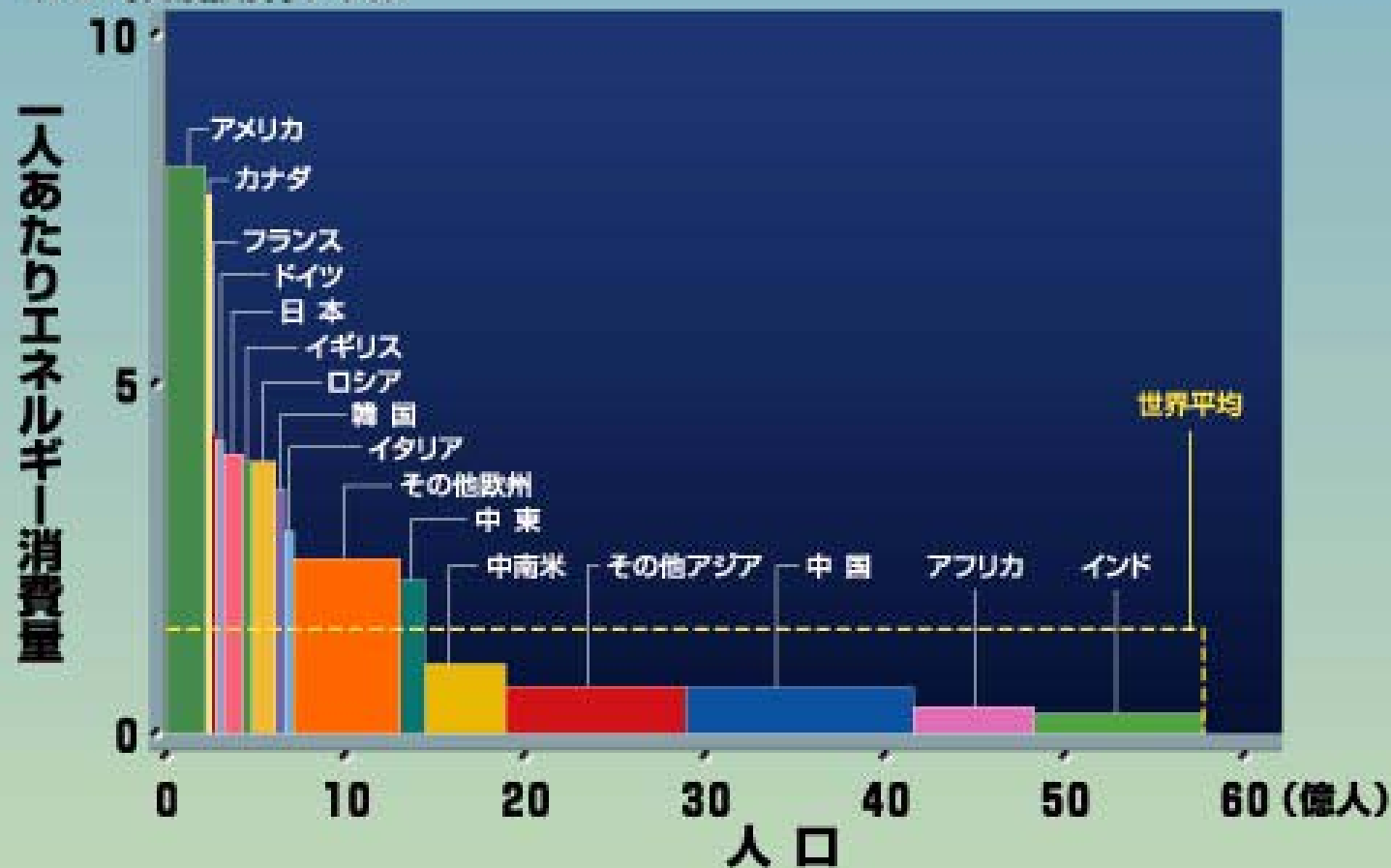
世界の一次エネルギー消費量の推移

(百万トン(石油換算))



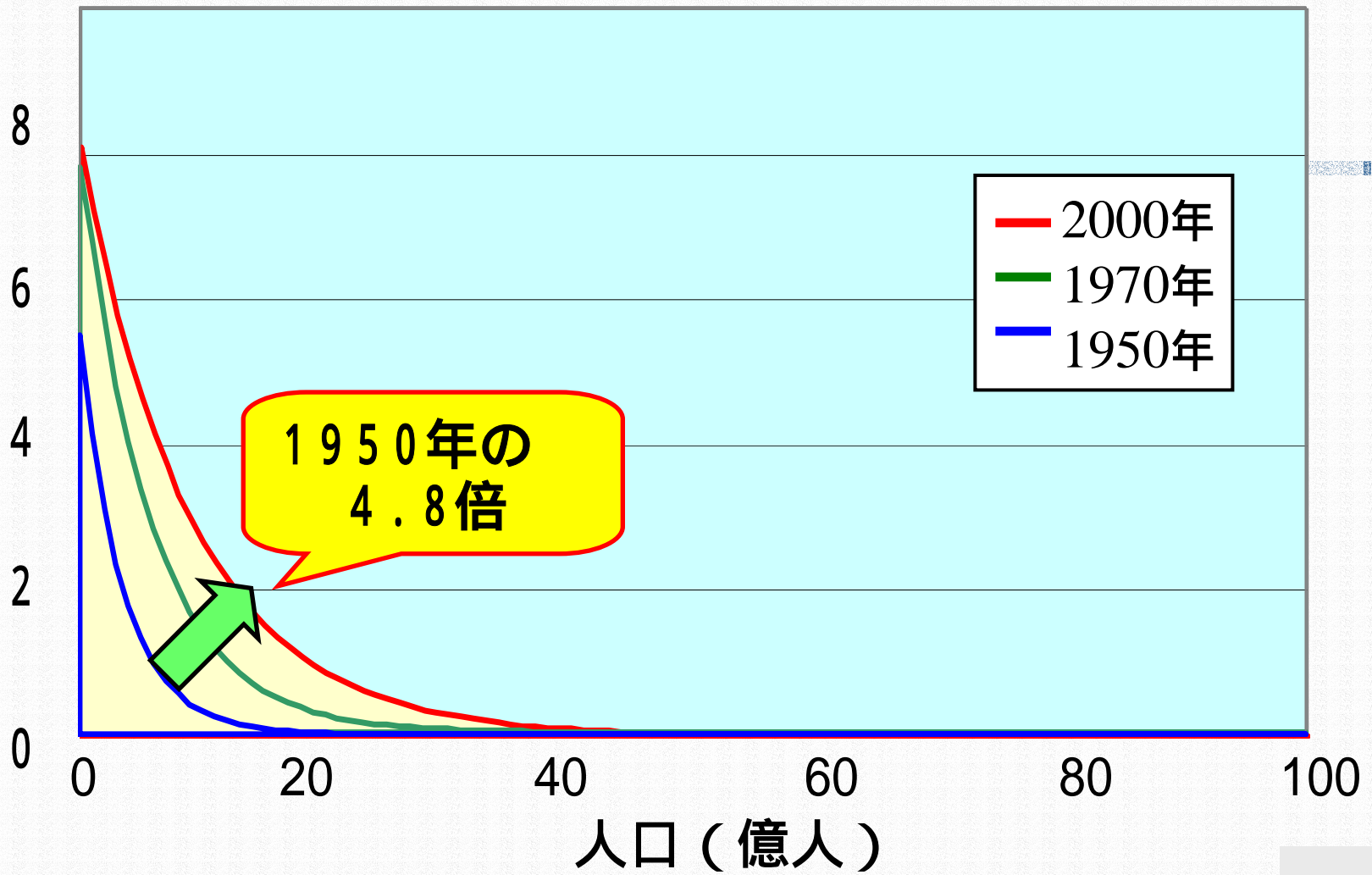
国別・地域別にみた人口と一人あたりのエネルギー消費量

〔トン(石油換算)／人〕



石油換算
(トン/人)
10

一人当たりエネルギー消費量と人口の推移



一人当たりエネルギー消費量と 人口の分布の予測

石油換算
(トン/人)

10

8

6

4

2

0

0

20

40

60

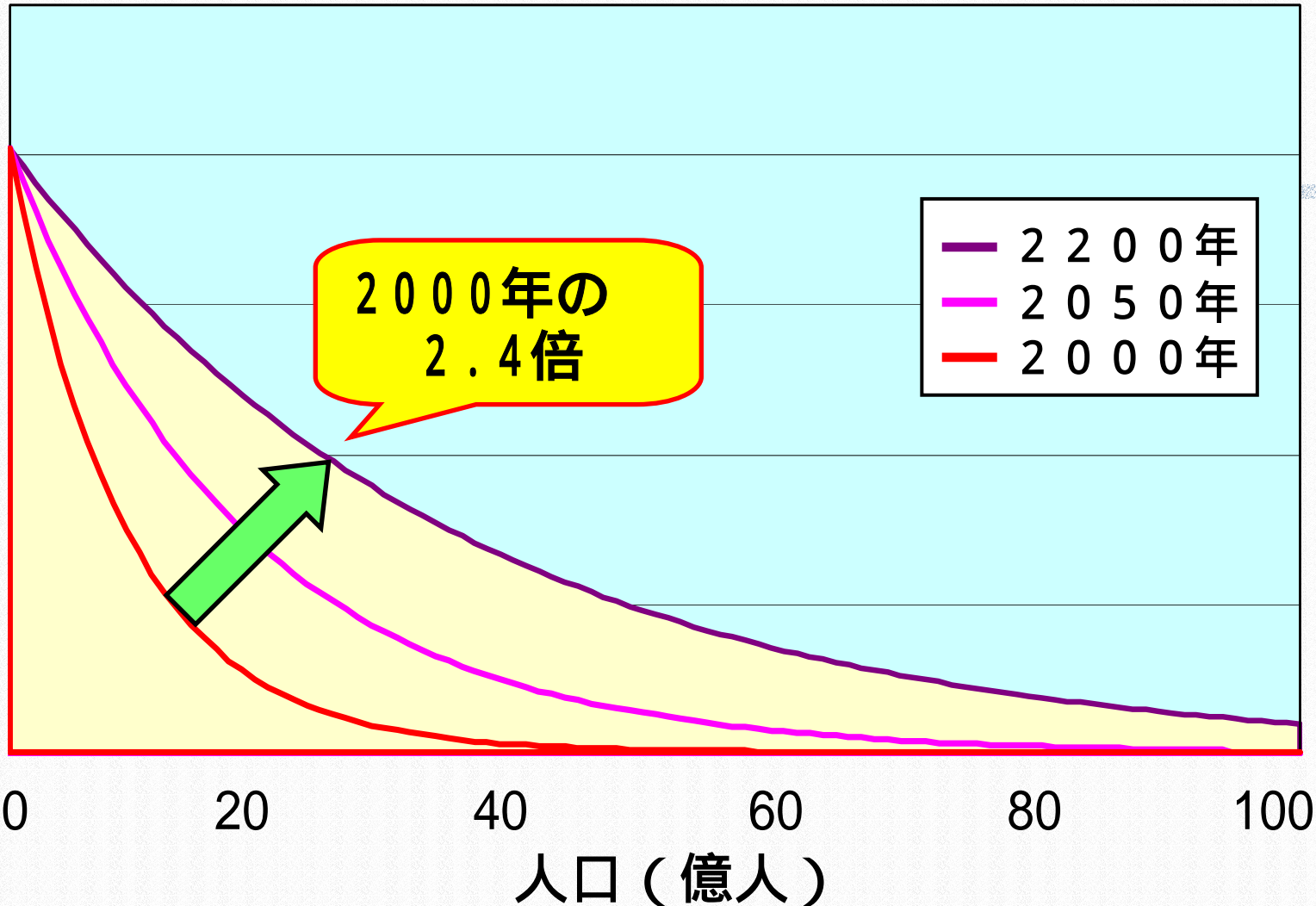
80

100

人口(億人)

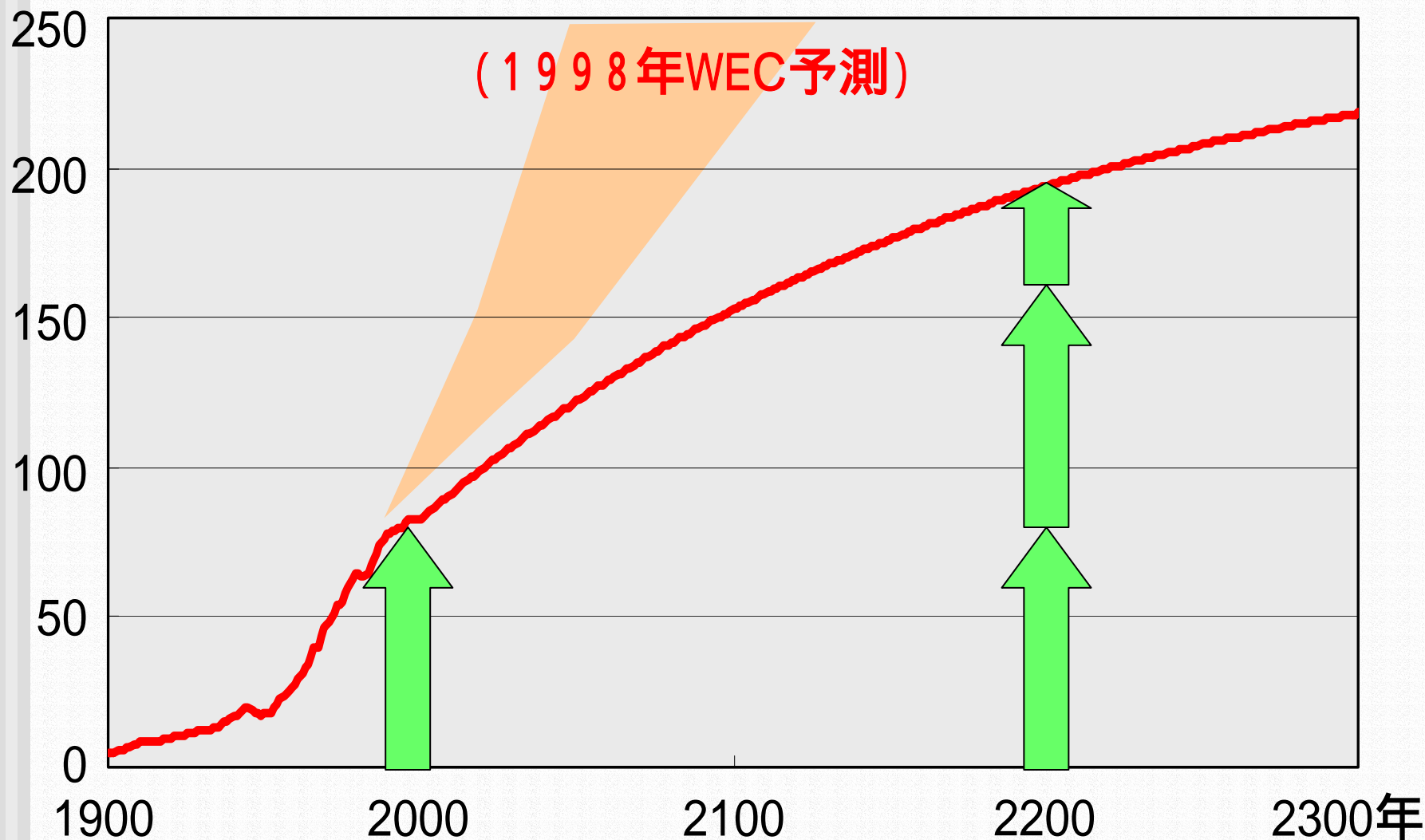
2000年の
2.4倍

— 2200年
— 2050年
— 2000年

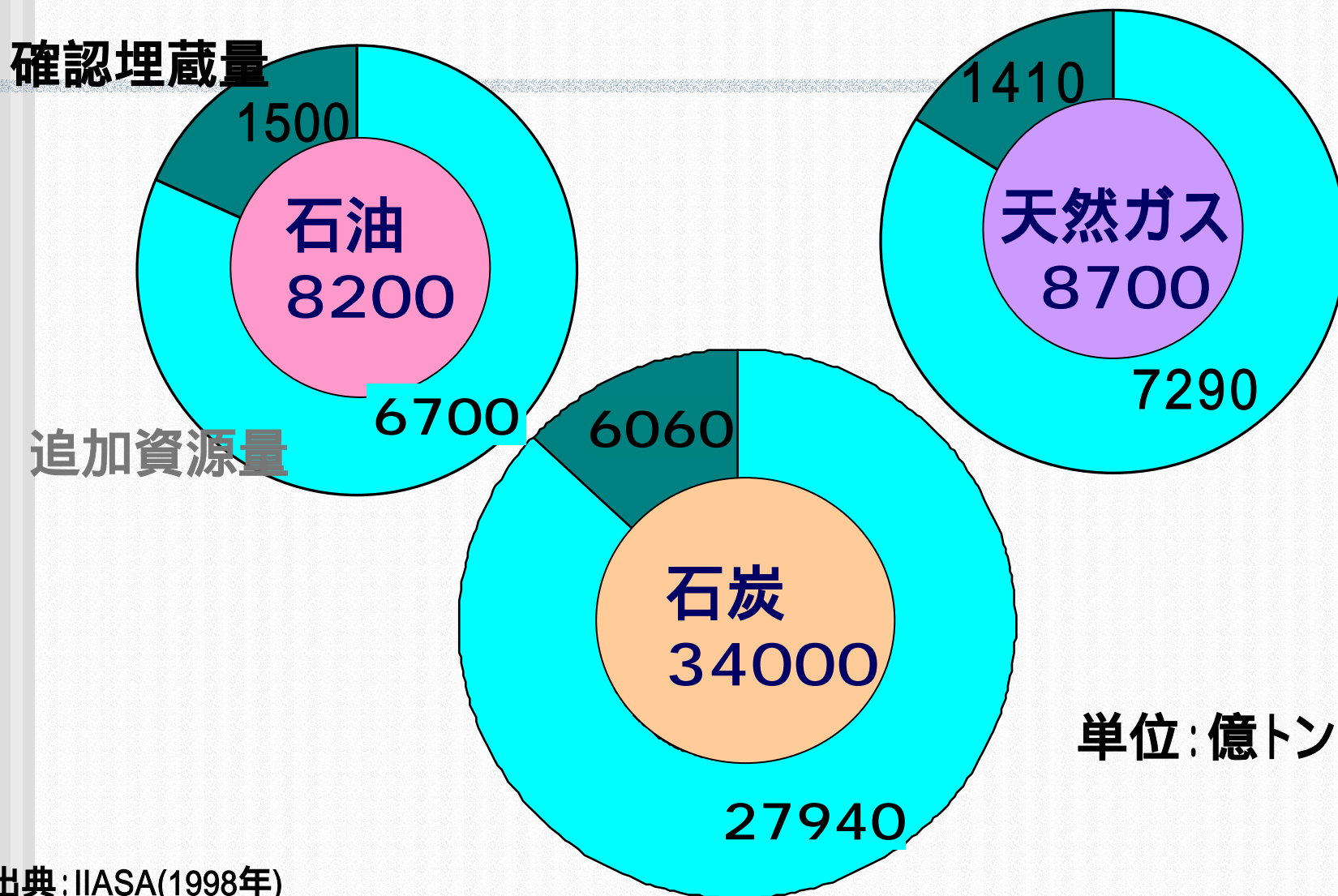


世界のエネルギー需要予測

億トン

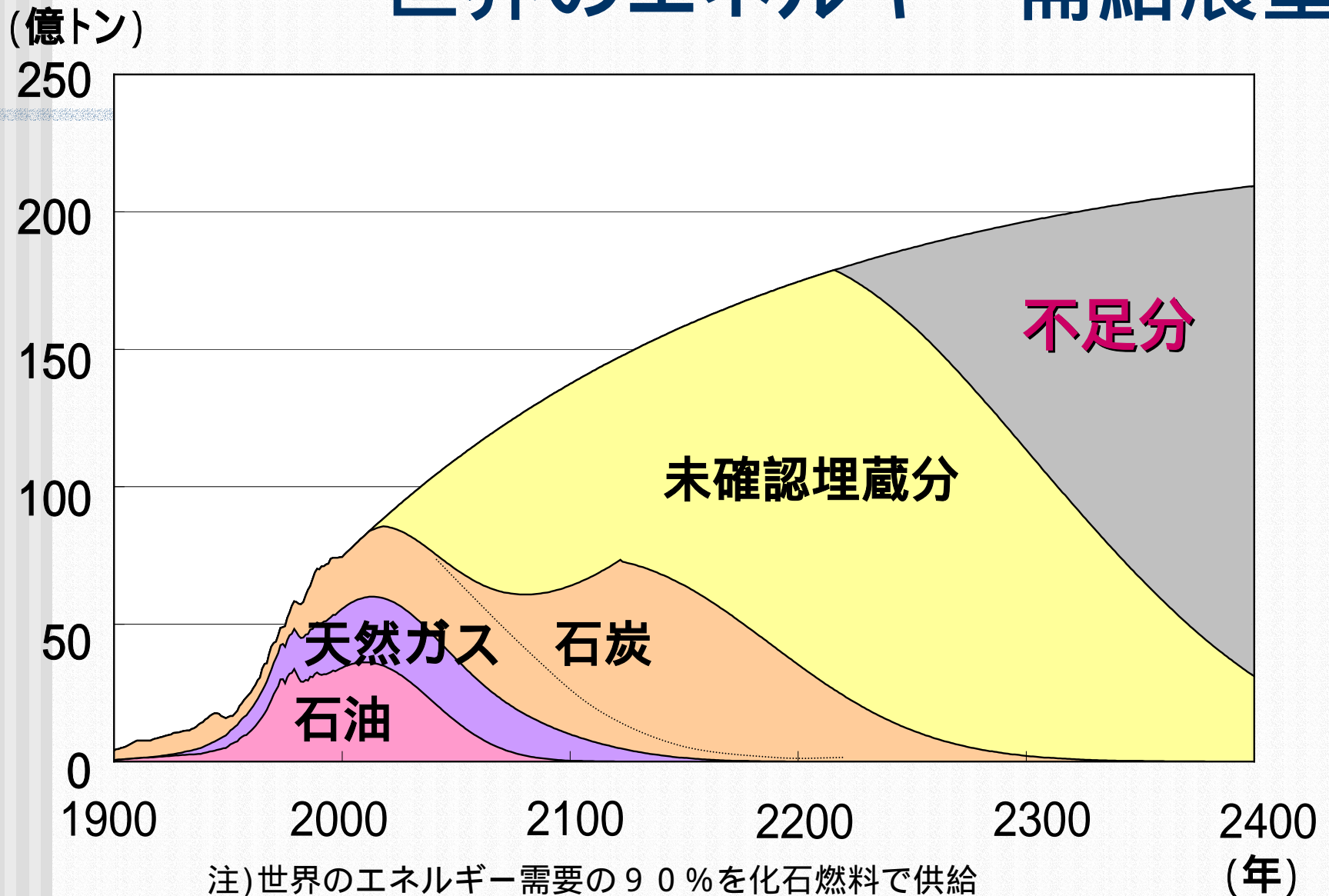


確認埋蔵量と資源量

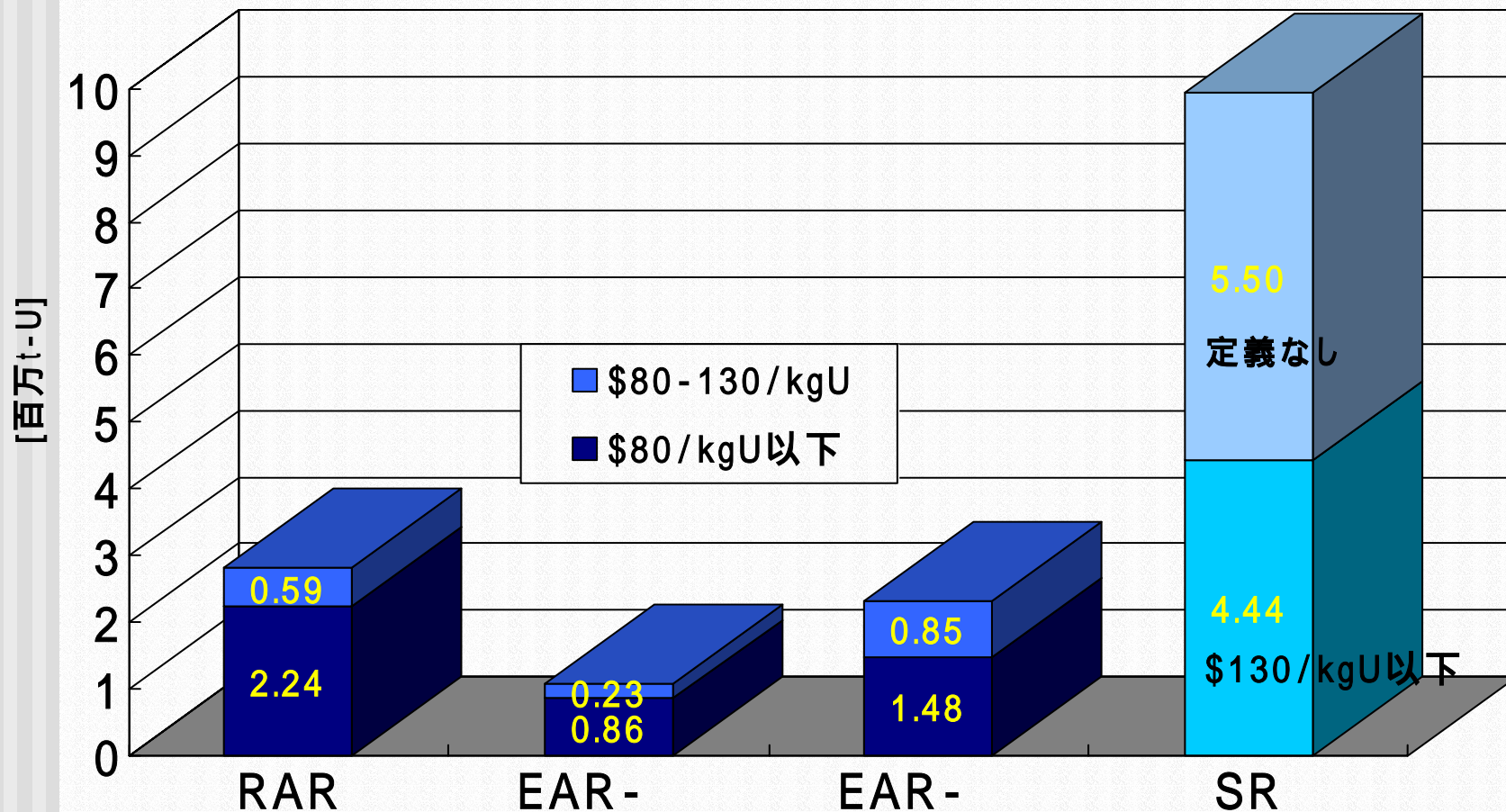


出典: IASA(1998年)

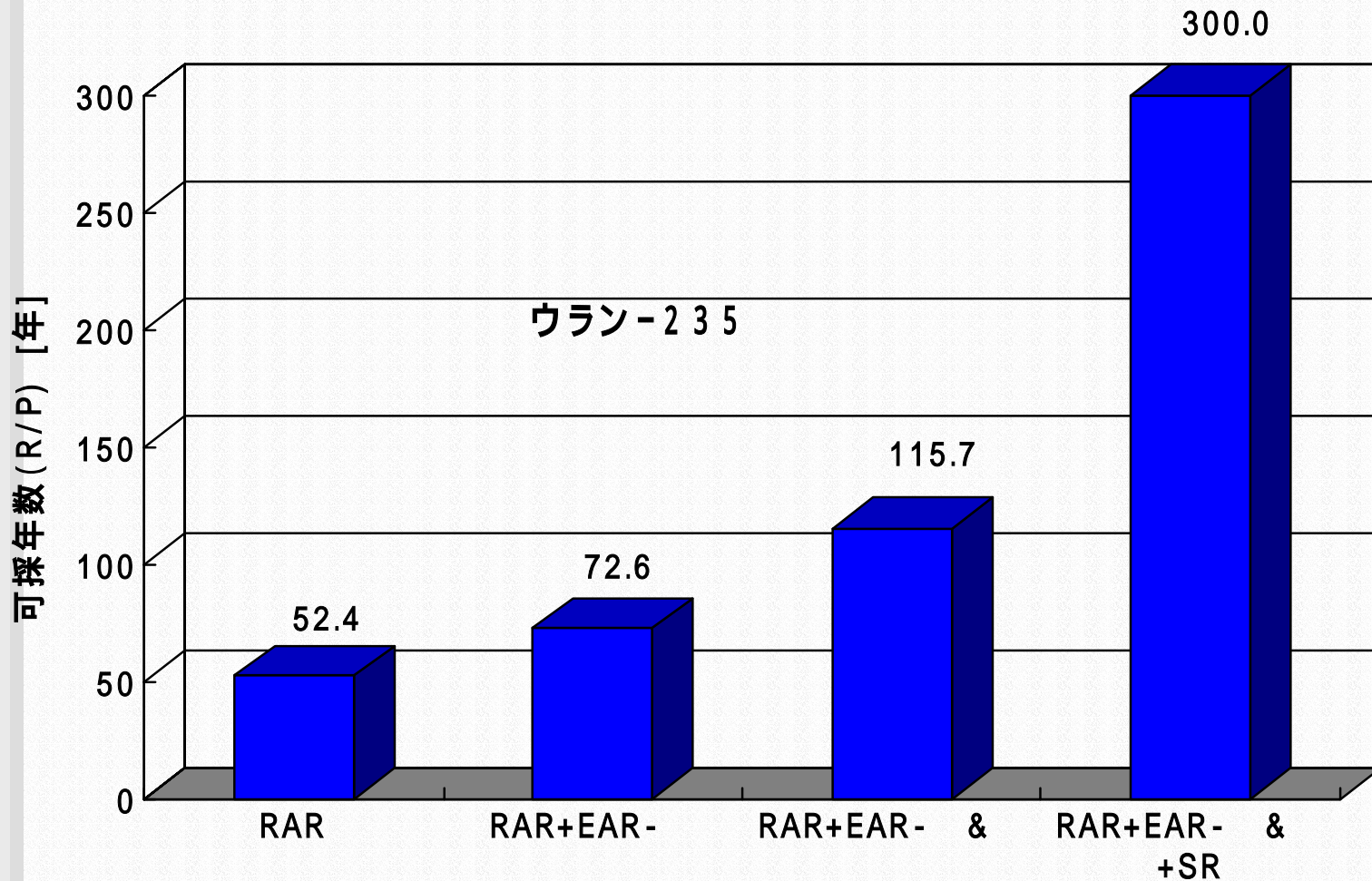
世界のエネルギー需給展望



ウランの資源量 (16.2百万t - U)



ウランの可採年数



回転機械の運動エネルギーと理論出力

$$(\text{運動エネルギー}) = (\text{質量}) \times (\text{流速})^2 / 2$$

$$(\text{理論出力}) = (\text{密度}) \times (\text{作動面積}) \times (\text{流速})^3 / 2$$

風力、水力、蒸気による出力の違い

| | 密度 [kg/m ³] | 流体速度 [m/s] | 単位面積あたり出力 |
|-----|----------------------------|------------------|-----------|
| 風力 | 1.29 | 20 | 1 |
| 水力 | 1,000 | 44 (有効落差100m) | 8,400 |
| 水蒸気 | 74 | 400 | 460,000 |

エネルギー密度の比較

| エネルギー源 | エネルギー密度[MJ/kg] | エネルギー源 | エネルギー密度[MJ/kg] |
|----------|-------------------|--------|----------------|
| ウラン(235) | 6.6×10^7 | 乾燥木材 | 14 ~ 15 |
| 原油 | 42 ~ 47 | 麦わら | 12 ~ 15 |
| 植物油 | 37 ~ 38 | 赤身の肉 | 5 ~ 10 |
| 天然ガス | 33 ~ 37 | 魚 | 2.9 ~ 9.3 |
| バター | 29 ~ 30 | じゃがいも | 3.2 ~ 4.8 |
| 石炭(瀝青炭) | 27 ~ 29 | 果物 | 1.5 ~ 4 |
| たんぱく質 | 23 | 人糞 | 1.8 ~ 3 |
| 石炭(褐炭) | 22 ~ 24 | 野菜 | 0.6 ~ 1.8 |
| シリアル穀類 | 15.2 ~ 15.4 | 尿 | 0.1 ~ 0.2 |

出典: Vaclav Smil, "Energies", MIT Press, 1999)

各種電源のエネルギー密度

--- 発電所敷地面積あたりの発電電力量 ---

| 対象 | 敷地面積あたりの電力 密度[kWh/m ² ・年] | 備考 |
|----------|---|---------------------------------|
| 家庭の電力需要 | 35 | 一戸建(敷地50坪、契約40A) |
| 事務所の電力需要 | 400 | 8階建て(延床面積3,000m ²) |
| バイオマス発電 | 2 | ポプラプランテーション(6年サイクル)、発電 効率34% |
| 風力発電 | 21 | 米国テハチャピWF、C.F.20% |
| 太陽光発電 | 24 | 家庭屋根(50坪、3kW、設備利用率15%) |
| 水力発電 | 100 | 日本の水力発電所約100箇所の平均値 |
| 石炭火力 | 9,560 | 碧南石炭火力(210万kW) |
| 原子力発電 | 12,400 | 柏崎刈羽(821.2万kW) |

正味エネルギー収支の試算例



風力発電と太陽光発電の経済性

- - 電力需要の1%を供給する費用は - -

| | 原子力発電 | 風力発電 | 太陽光発電 |
|---|--|--|--|
| 設備容量 [万 k W] | 1 3 5 | 5 4 0 | 9 0 0 |
| 費用(16 年間)[億円] (建設費) (燃料・運転保守) | 1 兆 3 0 0 億円 (4 , 1 8 5) (6 , 1 1 5) | 1 兆 4 , 2 5 6 億円 (1 0 , 8 0 0) (3 , 4 5 6) | 7 兆 2 , 0 0 0 億円 (9 0 , 0 0 0) (0) |
| 設置台数 [基] | 1 | 1 0 , 8 0 0 (現状 100 基 / 年) | 3,000,000 (現状 1 万 軒 / 年) |
| 試算条件 | | | |
| 単機出力 [kW] | 1,350,000 | 500 | 3 |
| 設備利用率 [%] | 80 | 20 | 12 |
| 建設単価 [万円 / kW] | 31 | 20 | 80 |
| 燃料単価 [円 / kWh] | 1.7 | 0 | 0 |
| 経済性前提 <ul style="list-style-type: none"> 燃料費 (原子力): $1.7 \text{ 円/kWh} \times 1,350,000 \text{ kW} \times 8,760 \text{ h} \times 0.8 = 160.8 \text{ 億円 / 年}$ 運転保守費 (原子力): 221.4 億円 / 年 年経費率 5.29% (運転維持 3.91%、一般管理費 0.50%、諸税 0.88%) 運転保守費 (風力): 年経費率 2 %、(太陽光): 年経費率 0 % | | | |

再生可能エネルギーの特徴と課題

| | 特徴 | | | | 課題 |
|-------|------------------------------------|------------------|------------------|--------------|------------------------------|
| | 利用方法 | 開発状況 | 利用率と特性 | 分布 | |
| 太陽熱・光 | 熱利用 発電（光、熱） パッシブシステム 生物利用 | 商用段階 （一部開発段階） | 発電：10～30% 間欠的 | 広域分散 | 材料 効率 コスト 気象データ |
| 水力 | 発電 動力利用 | 商用段階 | ベース負荷 季節変動 | 広域分散 山岳地帯 | 水問題 生態系影響 コスト |
| 風力 | 発電 揚水動力 帆船動力 | 商用段階 | 15～30% 間欠的 | 海岸、半島、 山岳 | 設計 風況データ 立地 |
| 海洋 | 波力 潮流 潮汐 海洋温度差 | 開発段階 | ベース負荷 間欠的 | 海岸 熱帯地域 | 材料 性能 コスト |
| 地熱 | 直接熱利用 発電（浅部、深部） 高温岩体 マグマ熱 | 商用段階 （一部開発段階） | ベース負荷 安定 | 火山地域 | 探索・抽出 掘削技術（高温 岩体、マグマ熱） |
| バイオマス | 燃焼利用 発酵 液化・ガス化 | 一部商用段階 | ベース負荷 季節変動 | 広域分散 | コスト 農林業管理 |

水力エネルギーの潜在利用可能量

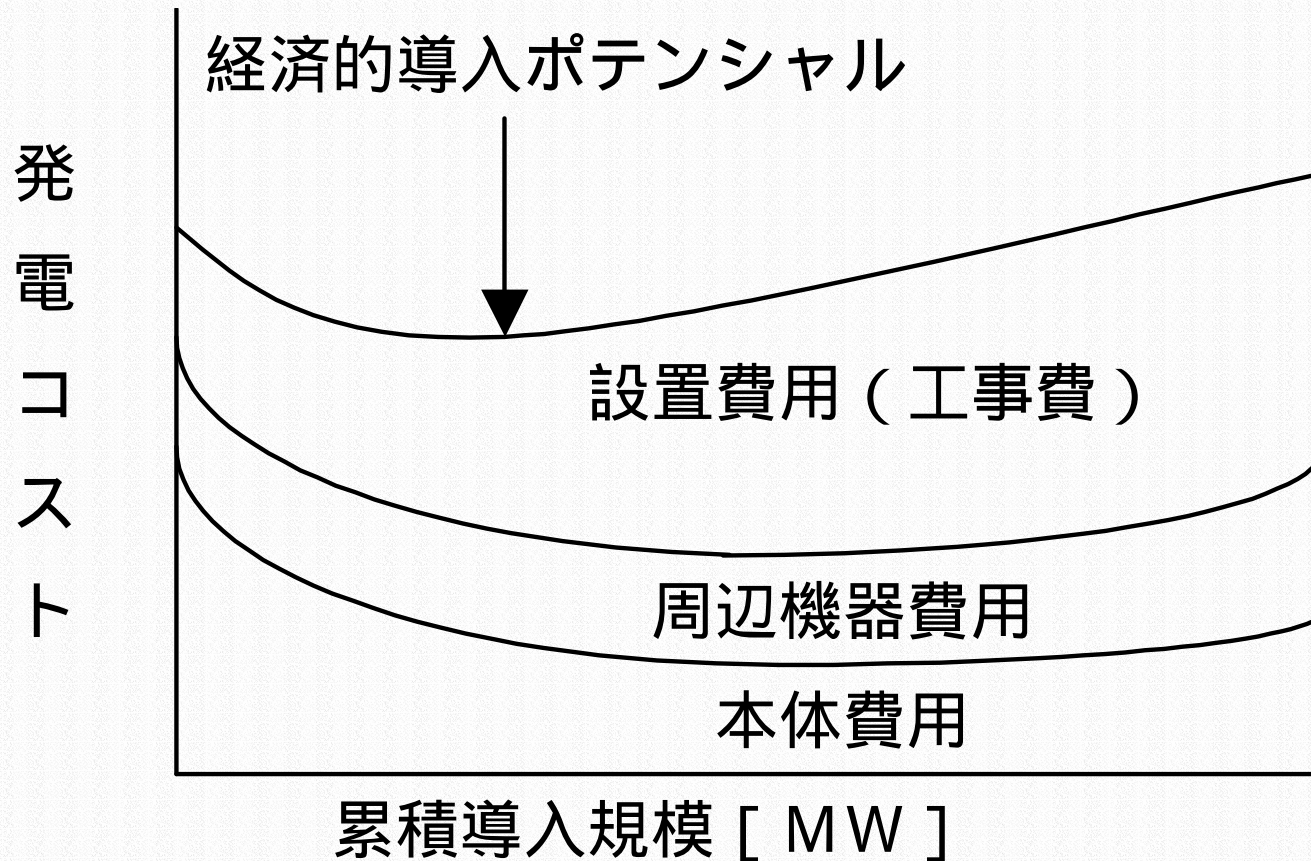
| 地域 | 包蔵水力 [TWh/年] | | | 水力発電 (1997 年) | | |
|----------|--------------|--------|-------|-----------------|----------------|----------------|
| | 理論的 | 技術的 | 経済的 | 設備量 [GWe] | 発電量 [TWh/年] | 建設中設備 [MWe] |
| 北米 | 5,817 | 1,510 | 912 | 141 | 697 | 882 |
| 中南米 | 7,533 | 2,868 | 1,199 | 114 | 519 | 18,331 |
| アフリカ | 3,294 | 1,822 | 809 | 16 | 48 | 1,464 |
| 中東 | 195 | 216 | 128 | 9 | 27 | 7,749 |
| 西欧 | 3,258 | 1,235 | 770 | 14 | 498 | 6,707 |
| 東欧 | 304 | 171 | 128 | 21 | 66 | 1,211 |
| 旧ソ連 | 3,583 | 1,992 | 1,288 | 66 | 225 | 16,613 |
| アジア計画経済 | 6,511 | 2,159 | 1,302 | 64 | 226 | 51,672 |
| 南アジア | 3,635 | 948 | 103 | 28 | 105 | 13,003 |
| 他アジア | 5,520 | 814 | 142 | 14 | 41 | 4,688 |
| 太平洋先進国 | 1,134 | 211 | 184 | 34 | 129 | 841 |
| 合計 | 40,784 | 13,945 | 6,964 | 655 | 2,582 | 124,161 |
| 合計 (*) | 40,500 | 14,320 | 8,100 | 660 | 2,600 | 126,000 |

* : 地域別データの不足分および過大評価分を調整 World Atlas, 1998

参考 : 世界の電力消費量 (13,928TWh/年[1997 年])

再生可能エネルギーの経済性

- 経済的条件の良い立地点のポテンシャル -



光合成の効率

光合成：葉緑素が太陽エネルギーによって CO_2 、水からデンプンを合成



植物の可視光利用率 : 50%

葉緑体の吸収効率 : 80%

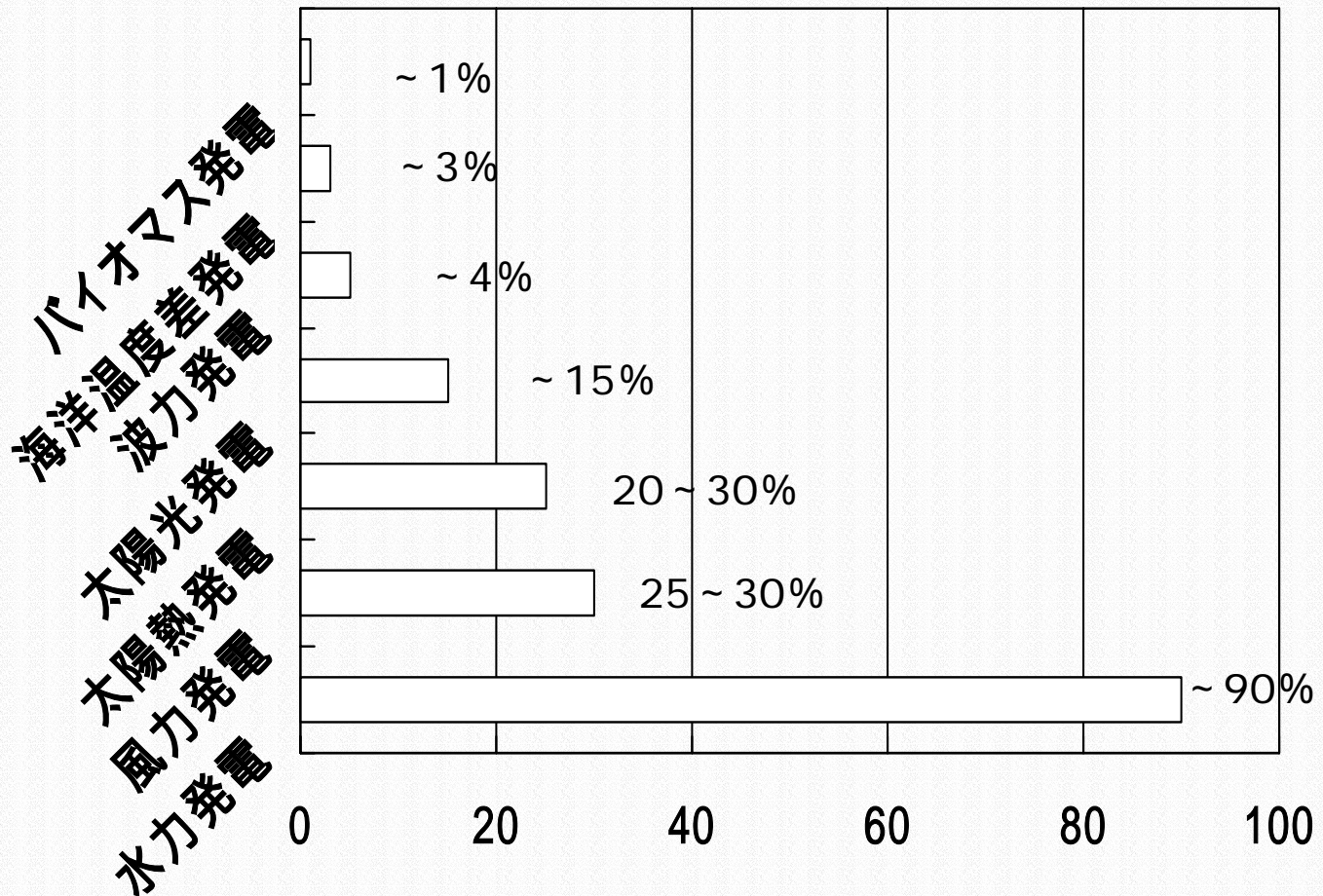
明反応 (光子 有機物[ATP, NADP]) : 28%

暗反応 (CO_2 グルコース) : 60%

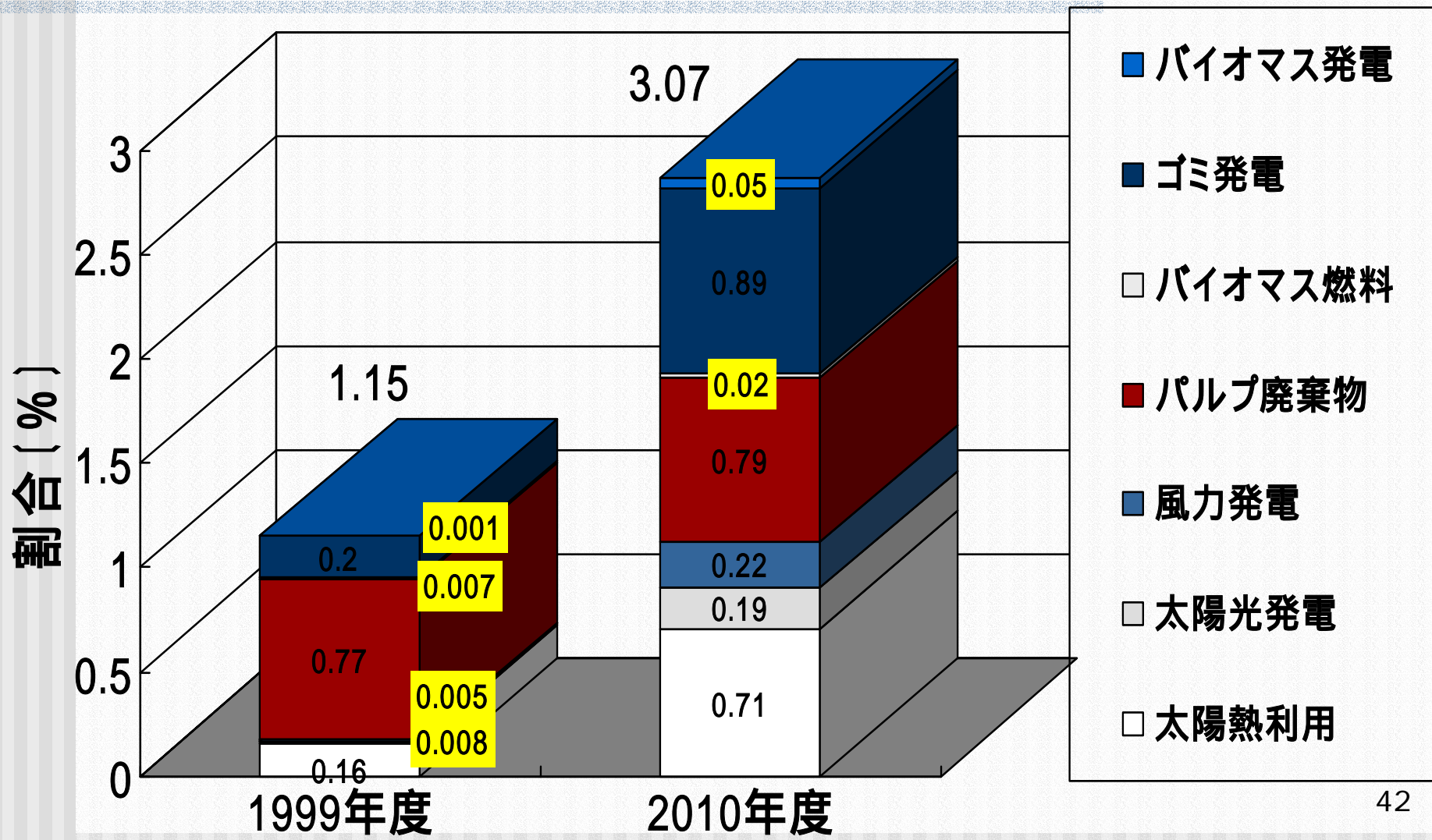
理論効率 6.7%

実際の効率 : 1 ~ 2 % (C4植物 : ~ 3 %)

太陽エネルギーの電力変換効率



我が国の新エネルギー導入目標



再生可能エネルギーの普及方策

- - 助成策が不可欠 - -

国からの補助金は期限限定
自発的な補助政策への移行

共同組合方式

グリーン電力基金

グリーン証書

R P S (renewable portfolio standard)

企業の税額控除

国と自治体による支援制度

これからの原子力技術に求められること

大型軽水炉の維持補修の高度化

(更新・寿命延伸への柔軟な対応)

国民が安心できる原子力技術

(固有安全炉、身近な小型原子炉)

原子力新産業の創出

(熱供給、淡水化、放射線利用)

柔軟性ある核燃料サイクルの確立

(国民の信頼性と経済性を考慮した技術継承)

アジア地域における原子力の役割と課題

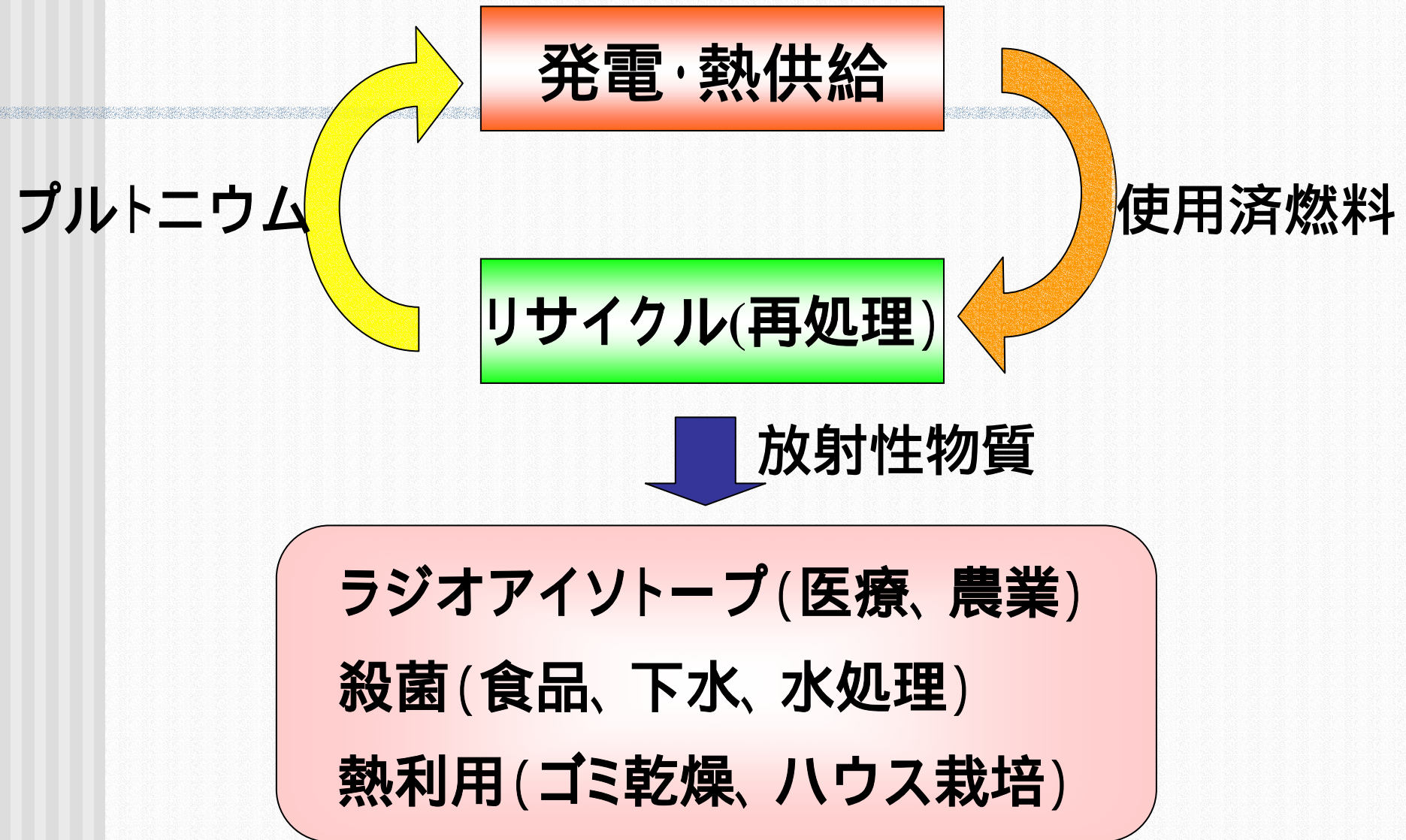
[役割]

脆弱なエネルギー供給構造からの脱却
酸性雨と地球温暖化への対策

[課題]

プルトニウム利用技術の開発
放射性廃棄物の処理処分技術の確立
核拡散防止に向けた地域協力

リサイクル型原子力システム



核融合について：利点

資源の豊富さ

放射線影響の軽減(トリチウムと放射化はある)

安全性が高い(炉の暴走がない)

核拡散問題の軽減

基礎科学の発展

核融合について：課題

基礎研究の段階

- ・導入は早くても21世紀の後半、
- ・技術的、経済的、社会的な面で評価が難しい

技術の位置づけ

- ・ベース電源の更新技術、
- ・水素の製造技術

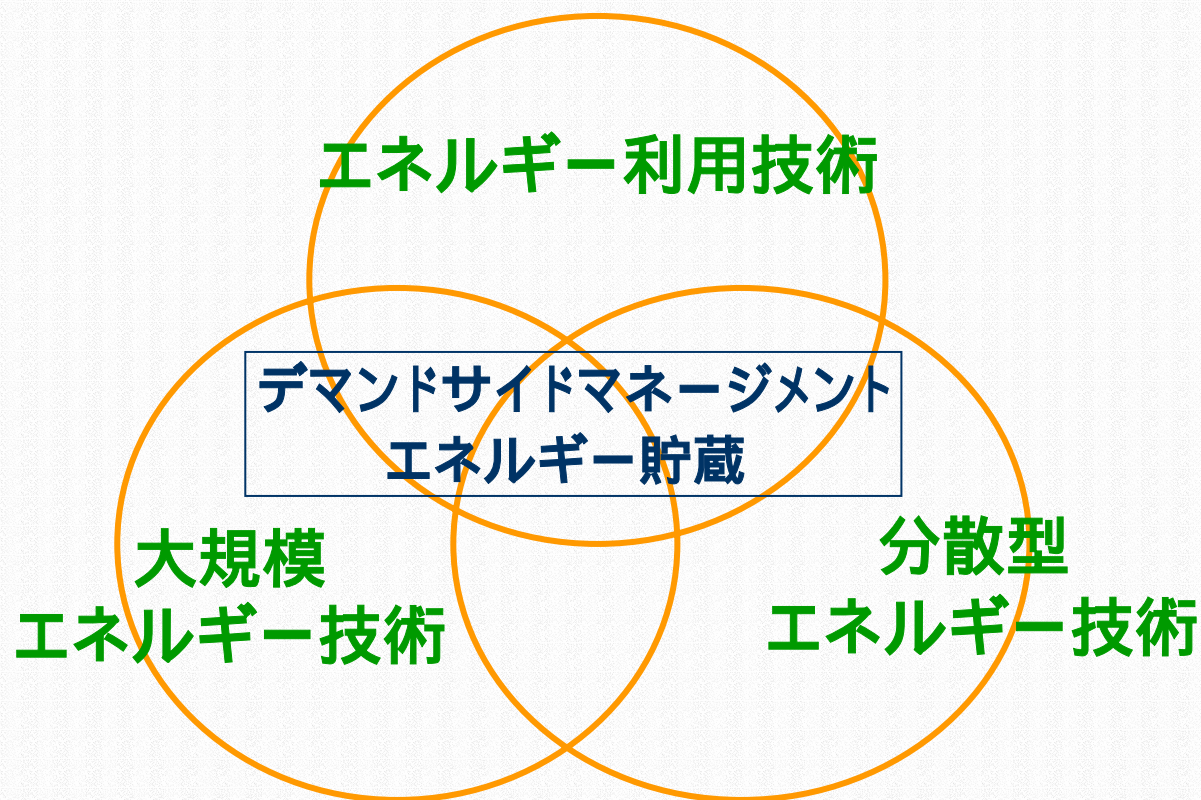
経済性問題

- ・巨額な初期投資、
- ・電気代などの運転維持費、
- ・投資資金の回収、
- ・市場の波及効果が小さい、
- ・限られた国の科学研究費、

開発体制

- ・若者の原子力離れ、
- ・原子力関連機関の合理化、
- ・民間企業の研究意欲の低下

これからのエネルギー技術開発 ～ “規模の経済” から “範囲の経済” へ～



省庁横断の総合エネルギー政策

省エネ・環境重視のインフラ整備

(国土交通省、経済産業省)

都市のエネルギー・環境政策

(環境省、国土交通省、経済産業省、地方自治体)

地球規模のエネルギー・環境政策

(環境省、外務省、農水省、国土交通省、経済産業省)

エネルギー・環境税制の見直し

(財務省、国土交通省、経済産業省)

エネルギー教育

(文部科学省、環境省、経済産業省)